



## Modalanalyse er et effektivt værktøj til vingeafprøvning

Hansen, M.H.

*Publication date:*  
2000

*Document Version*  
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

*Citation (APA):*  
Hansen, M. H. (2000). *Modalanalyse er et effektivt værktøj til vingeafprøvning*. Resultatblad AED-RB No. 12(DA)

---

### General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

# Modalanalyse er et effektivt værktøj til vingeafprøvning

af

Morten H. Hansen



Aeroelastisk Design  
Afdelingen for Vindenergi og Atmosfærefysik  
Forskningscenter Risø, Roskilde  
Juni 2000

---

Titel og forfatter(e)

Modalanalyse er et effektivt værktøj til vingeafprøvning.

Morten H. Hansen

---

Review

Flemming Rasmussen og Jørgen Thirstrup Petersen

---

Program og afdeling

Aeroelastisk Design

Afdelingen for Vindenergi og Atmosfærefysik

Dato

Juni 2000

---

Registreringsnummer

AED–RB–12

Projekt/Kontrakt

ENS

51171/97-0043

---

Klassifikation

Offentlig

---

Bemærkninger

Metodeudarbejdelsen og eksperimentet, som er grundlag for dette resultatblad, er udført under *Forprojekt for videreudvikling af vingeafprøvning* (ENS 51171/97-0043) af Gunner Larsen, Andreas Baumgart, Søren M. Petersen og Morten H. Hansen fra Risø og Ingemar Carlén fra Teknikgruppen AB. Projektet er delvis finansieret af Energistyrelsen

---

Resumé

Resultatet af en eksperimentel *modalanalyse* på en LM 19.1 vinge er præsenteret. Det er vist, at med modalanalyse kan *alle* svingningsformer i et valgt frekvensområde identificeres og bestemmes rumligt. Egenfrekvenserne kan bestemmes med en usikkerhed på under 1 % og logaritmiske dekrementer med en usikkerhed på under 5 % og med minimal indflydelse af aerodynamisk dæmpning. De målte svingningsformer for LM 19.1 vingen er sammenlignet med svingningsformer beregnet med HawC og ANSYS, og der er opnået rimelig overensstemmelse.

---

Kan rekvireres fra:

Afdelingen for Vindenergi og Atmosfærefysik, Forskningscenter Risø  
P.O. Box 49, DK-4000 Roskilde  
Telefon 46 77 50 54 · Fax 46 77 50 83

Dette er et resultatblad fra forskningsprogrammet Aeroelastisk Design ved Afdelingen for Vindenergi og Atmosfærefysik, Forskningscenter Risø. Resultatbladets målgruppe er primært den danske vindmølleindustri og dansk vindmølleforskning i øvrigt. Formålet er at formidle opnåede forskningsresultater på en kort og letfordøjelig form, samt at kunne publicere opnåede resultater så tidligt som muligt. Resultaterne kan være foreløbige erkendelser eller sammendrag af udgivne publikationer. Såfremt rapporteringen er foreløbig, vil det fremgå af teksten. Anden og eventuelt senere planlagt rapportering vil fremgå af databladet og evt. litteraturlisten.

## Indledning

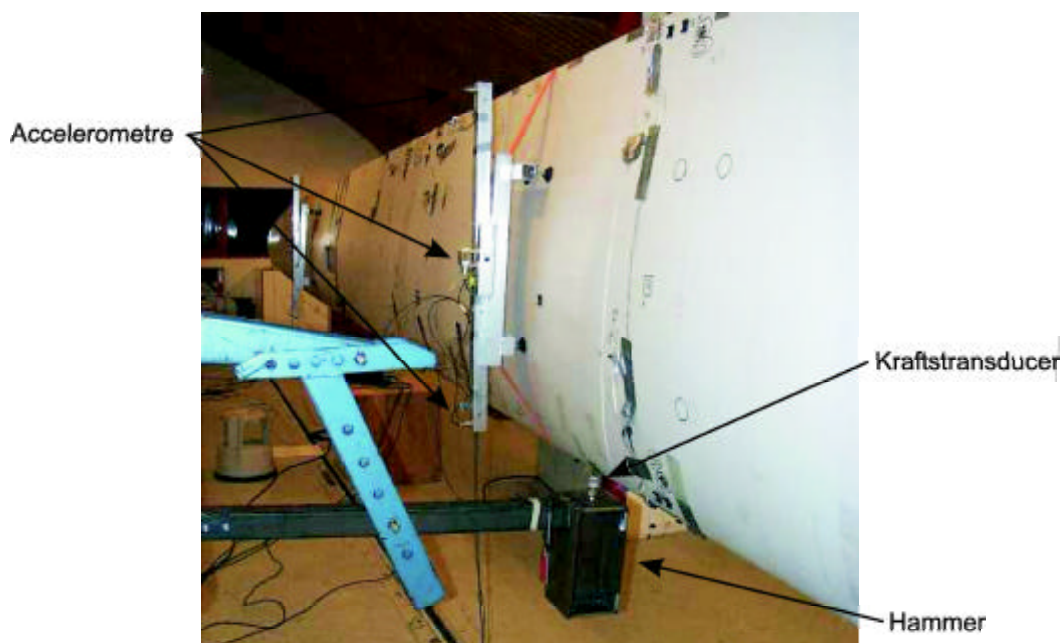
Egenfrekvenser, strukturel dæmpning og svingningsformer for en vindmølles vinger er vigtige for laster og stabilitet [1, 4]. Det er derfor vigtigt at kunne måle disse dynamiske egenskaber, og på den baggrund vurdere modellerne, der bruges ved design af en vindmølle. Yderligere kan målte svingningsformer nu direkte anvendes til beregning af de modale aerodynamiske dæmningsforhold for en vinge med programmet *HAWCDAMP* udviklet på Risø [3].

Eksperimentel *modalanalyse* er en metode til at estimere svingningsformer, frekvenser og dæmpning af *alle* svingningsformerne i et bestemt frekvensområde. Risø har gennemført en modalanalyse af LM 19.1 vingen, for hvilken både en HawC- og en ANSYS-model er til rådighed. Resultaterne af dette eksperiment er præsenteret og sammenlignet med modellerne i dette resultatblad. Det konkluderes, at modalanalyse er et effektivt værktøj i forbindelse med vingeafprøvning, som kan give et solidt grundlag for last- og stabilitetsberegninger.

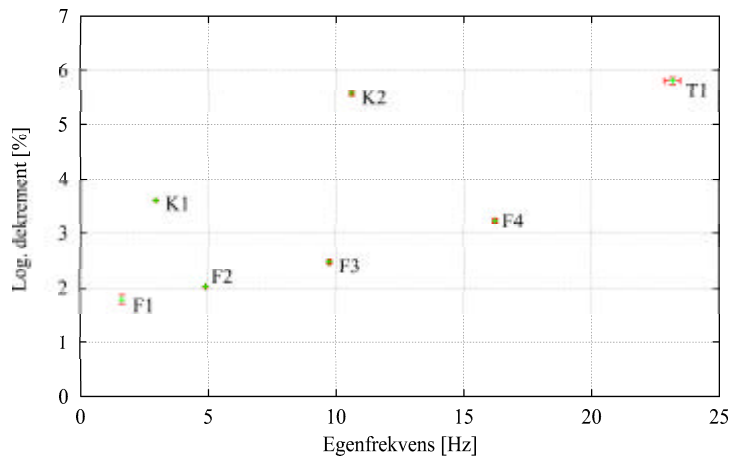
## Hvordan foretages modalanalysen?

Modalanalysen består af måling og analyse. Figur 1 viser dele af det måleudstyr, som blev brugt ved målingen på LM 19.1 vingen. I et bestemt punkt anslås vingen med en hammer, hvorved alle lavere egensvingningsformer exciteres. Ved hvert hammerslag måles kraften og accelerationen i tre retninger ud fra målinger i tre punkter på et tværsnit. Ved at flytte måletværsnittet opnås *overføringskarakteristikker* for hele vingen. I *analysefasen* estimeres vingens egenfrekvenser, logaritmiske dekrementer og svingningsformer ud fra disse overføringskarakteristikker og den geometriske beskrivelse af vingen. Den rumlige opløsning af svingningsformerne og det statistiske grundlag for beregning af frekvenser og dæmpning afhænger af antallet af målepunkter.

Afgørende for modalanalysens resultat er nøjagtigheden af de målte overføringskarakteristikker, målepunkternes positioner og måleretningerne. Især bestemmelsen af torsionsindholdet i svingningsformerne er følsom over for den geometriske beskrivelse af de enkelte tværsnit. En detaljeret beskrivelse og diskussion af metoden findes i [2]. Endelig skal det nævnes, at stivheden af vingens indspænding ikke er målt, hvorved den systematiske usikkerhed som følge af indspændingens fleksibilitet ikke kan vurderes.



Figur 1: Vingen exciteres med en hammer. Tre accelerometre placeret på en "målebro" måler accelerationen i tre punkter og to retninger (to flappvis og en kantvis retning). Målebroen anvendes til at justere retningerne og positionerne af accelerometrene. En kraftstransducer på hammeren måler kraften ved slaget.



Figur 2: Målte egenfrekvenser og logaritmiske dekrementer for LM 19.1 vingen. Standardafvigelse er vist med røde bjælker. Notation: F = flap, K = kant og T = torsion.

## Resultater

Eksperimentet med LM 19.1 vingen viser, at

- egenfrekvenserne kan bestemmes med en relativ standardafvigelse på højst 1 %,
- logaritmiske dekrementer kan bestemmes med en relativ standardafvigelse på højst 5 %,
- svingningsformerne kan estimeres for et antal tværsnit på vingen.

Derudover viser eksperimentet, at svingningsamplituden af vingen efter hammerslaget er så lille, at indflydelsen af aerodynamisk dæmpning på bestemmelsen af den strukturelle dæmpning praktisk taget er elimineret.

### Frekvenser og dæmpning for LM 19.1 vingen

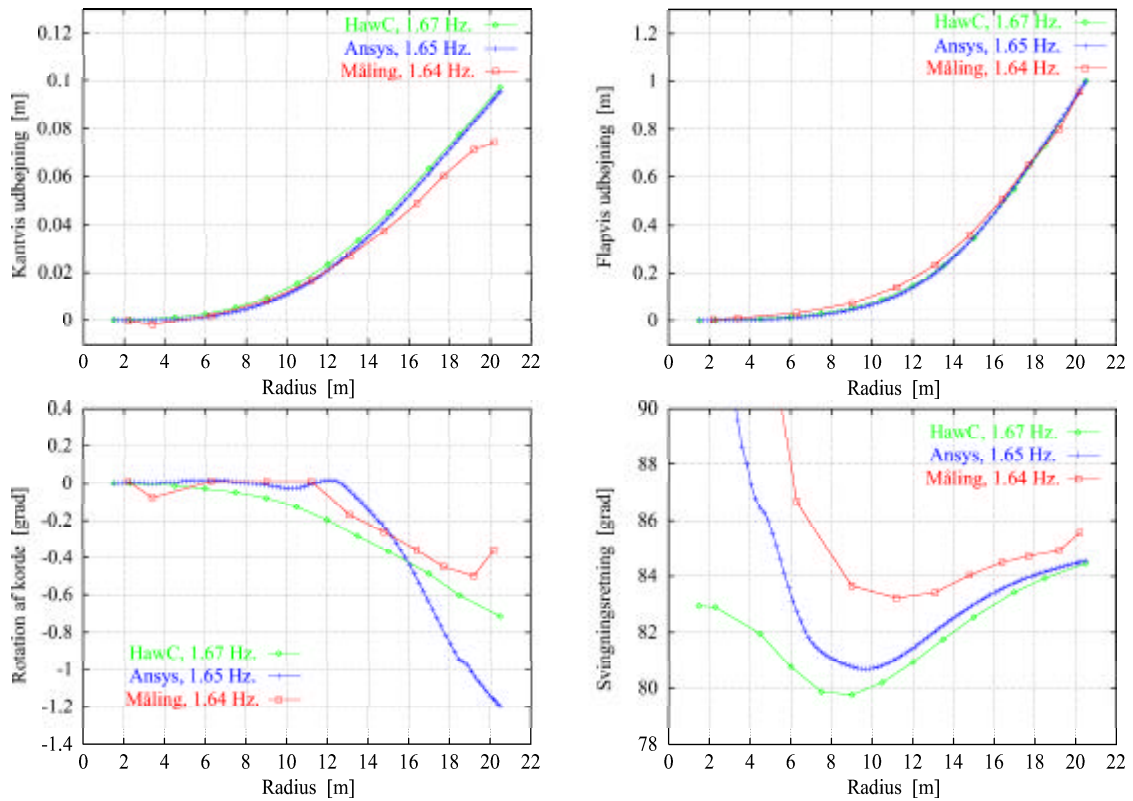
Figur 2 viser de målte egenfrekvenser og dæmpning som logaritmiske dekrementer for svingningsformerne for LM 19.1 vingen i frekvensområdet 0–25 Hz. I dette frekvensområde er der syv svingningsformer: fire flapvise, to kantvise og første torsionssvingningsform. Forskellen i strukturel dæmpning mellem flapvise og kantvise svingningsformer skyldes hovedsageligt, at det pågældende blad er bygget med stor kantvis dæmpning. Standardafvigelserne er beregnet på basis af 48 individuelle estimater og vist med røde bjælker.

Ved en traditionel måling af det logaritmiske dekrement anslås den pågældende svingningsform, hvorefter dekrementet af den frie dæmpede svingning estimeres fra den målte tidsserie. Dette gøres ved forskellige svingningsamplituder for at vurdere effekten af aerodynamiske dæmpning. Dekrementer for første flapvise svingningsform opnået ved en traditionel måling på samme LM 19.1 vinge viser, at dæmpningen falder med faldende svingningsamplitude. I modalanalysen er den aerodynamiske dæmpning af vingen minimal, idet den relative svingningsamplitude af tippen er under 0.5 % af vingens længde. Dekrementet fra modalanalysen stemmer således overens med dekrementet fra den traditionelle måling ved den laveste svingningsamplitude.

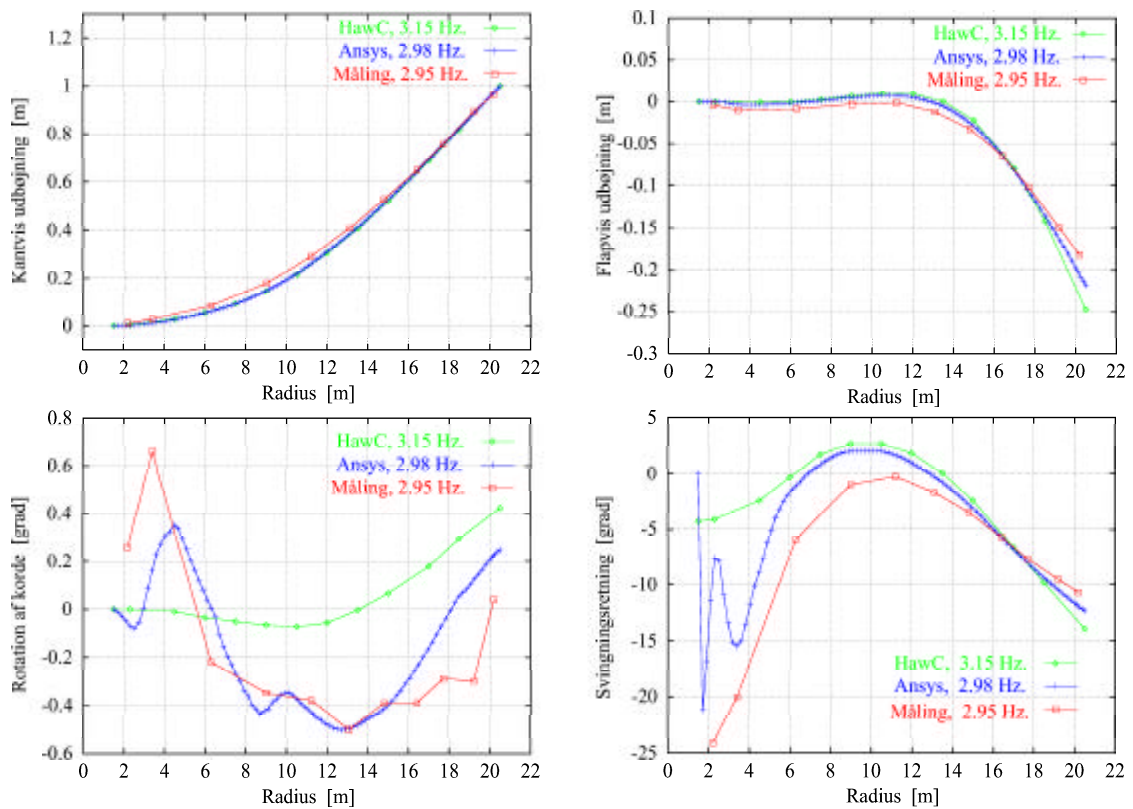
### Svingningsformer for LM 19.1 vingen

Figur 3–5 viser målte og beregnede svingningsformer for LM 19.1 vingen. I hver figur ses fire diagrammer, som viser kantvis og flapvis udbøjning, torsion og svingningsretningen af den pågældende svingningsform (for beskrivelse af “svingningsretningen” se [4]). Hver svingningsform er normeret således, at den største kantvise eller flapvise udbøjning af tippen er 1 m. Målte og beregnede egenfrekvenser er også anført i diagrammerne.

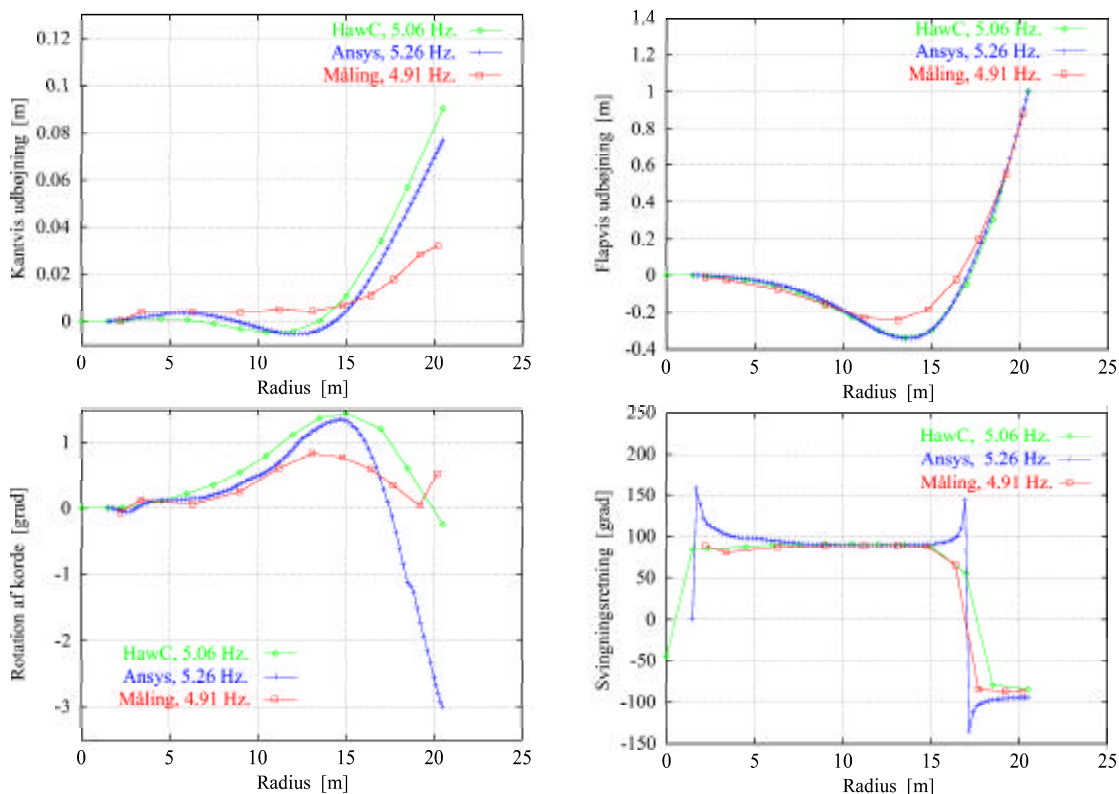
En beregning af standardafvigelser for de målte svingningsformer er ikke mulig, idet alle målinger bliver brugt til én estimation af svingningsformerne. Det ses dog, at de kantvise og flapvise udbøjninger i Figur 3–5 er glatte funktioner af radius, mens torsionen af tværsnittene er mere varierende. Bestemmelsen af torsion er følsom overfor afstanden mellem de to flapvise accelerometre, især fordi torsionsindholdet er meget lavt. Ved fremtidige målinger søges estimeringen af torsion forbedret. Bemærk, at for alle svingningsformerne er fejlen størst i sidste tværsnit, hvilket skyldes, at målebreen er vanskelig at fastgøre til vingen, når korden er for kort.



Figur 3: Kantvis og flapvis udbøjning, torsion og svingningsretning for **første flapvise** svingningsform.



Figur 4: Kantvis og flapvis udbøjning, torsion og svingningsretning for **første kantvise** svingningsform.



Figur 5: Kantvis og flapvis udbøjning, torsion og svingningsretning for **anden flapvise** svingningsform.

Sammenligning med de beregnede svingningsformer viser en god overensstemmelse mellem de kantvise og flapvise udbøjninger. Derimod stemmer de målte og beregnede indhold af torsion ikke særligt godt overens. Det skyldes især, at beregningen af torsionsindholdet er meget afhængig af modelleringen af vingens strukturelle egenskaber, hvilket også ses ved forskellen mellem HawC og ANSYS beregningerne. Mindre forskelle mellem de målte og beregnede udbøjninger bliver forstærket, når svingningsretningerne i Figur 3–5 sammenlignes. Det er dog værd at bemærke, at tendenserne af svingningsretningerne langs radius er godt beskrevet ved både HawC- og ANSYS-modellen. Dette resultat er vigtigt for vurderingen af tidligere stabilitetsanalyser [4], hvor et par graders forskel i svingningsretning kan vise sig afgørende for en vingens stabilitet.

Den største forskel mellem de beregnede og målte frekvenser er 7 %, hvilket overstiger standardafvigelseerne i målingerne. Dette kan forklares ved utilstrækkelige oplysninger om vingens strukturelle data ved beregningerne, og viser dermed yderligere værdien af modalanalyse.

## Litteratur

- [1] M. H. HANSEN AND H. A. MADSEN, *Kan dynamisk instabilitet ved lave indfaldsvinkler blive et problem?*, Resultatblad AED–RB–11, Aeroelastisk Design, Afdelingen for Vindenergi og Atmosfærefysik, Forskningscenter Risø, Roskilde, Maj 2000.
- [2] G. LARSEN, M. H. HANSEN, A. BAUMGART, AND I. CARLÉN, *Modal analysis of wind turbine blades*, R 1181(EN) (to appear), Risø, 2000.
- [3] K. THOMSEN AND J. T. PETERSEN, *HAWCDAMP v. 1.0 - beregning af aerodynamisk dæmpning*. Manual, Marts 2000.
- [4] K. THOMSEN, J. T. PETERSEN, AND M. L. THØGERSEN, *Vingers svingningsformer er vigtige for kant-svingninger*, Resultatblad AED–RB–8, Aeroelastisk Design, Afdelingen for Vindenergi og Atmosfærefysik, Forskningscenter Risø, Roskilde, Marts 1999.